

Lucia IVANIČOVÁ<sup>1</sup>

## VPLYV HORNINOVÉHO PROSTREDIA NA PARAMETRE PROCESU RAZENIA TBM

### INFLUENCE OF ROCK MASS ON THE TBM TUNNELLING PROCESS

#### Abstrakt

Pri razení prieskumnej štólne tunela plnoprofilovým raziacim strojom je možné využiť monitorovací systém, ktorý umožňuje určovať charakteristiky horninového masívu nepriamo z parametrov procesu razenia plnoprofilovým raziacim strojom (TBM). Príspevok sa venuje sledovaniu a analýze vplyvov horninového prostredia na proces razenia prieskumnej štólne diaľničného tunela Branisko plnoprofilovým raziacim strojom.

#### Abstract

Monitoring system applied at the full-profile tunnel boring machine during the excavation of exploratory gallery of the Branisko tunnel enables to determine the rock mass characteristics indirectly, i.e. from the parameters of TBM tunnelling process. The paper focuses on the observation and analysis of the effects of the rock surroundings on the process of tunnel excavation exploratory gallery of Branisko motorway tunnel driven by TBM.

Key words: rock mass, analysis of variance, TBM.

## 1 ÚVOD

Stav diaľničnej siete na Slovensku býva často predmetom kritiky a polemík. Plánované trasy diaľnic prechádzajú hornatým terénom Západných Karpát, čo vyžaduje výstavbu celého radu diaľničných tunelov. Na automatizáciu procesu razenia tunelov sa využívajú raziace stroje s plnoprofilovým razením, tzv. TBM (Tunnel Boring Machines). V súčasnosti sa vo svete vyrába a používa viacero druhov TBM, ktoré umožňujú ich nasadenie v rôznych geologických podmienkach, od tvrdých skalných hornín až po mäkké zvodnené zeminy.

V rámci výstavby diaľničnej siete na Slovensku boli plnoprofilové raziace stroje nasadené pri razení prieskumnej štólne diaľničného tunela Branisko (WIRTH TB-II-330H/M) smerom od východného portálu a prieskumnej štólne tunela Višňové – Dubná Skala (Voest Alpine ATB 35HA) od východného portálu. Príspevok sa venuje analýze kľúčových faktorov horninového prostredia, ktoré ovplyvňovali proces strojného razenia tunelov v horninovom masíve Braniska.

---

<sup>1</sup> Ing. Lucia Ivaničová, PhD., Ústav geotechniky SAV, Watsonova 45, 043 53 Košice, Slovenská republika, tel. +421 55 7922641, e-mail: ivanic@saske.sk

## 2 KĽÚČOVÉ FAKTORY V PROCESE PLNOPROFILOVÉHO RAZENIA

Proces plnoprofilového razenia tunelov ovplyvňuje celý rad faktorov, ktoré možno rozdeliť do dvoch hlavných skupín:

1. Faktory horninového prostredia zahŕňajúce vplyvy razenej horniny - jej geologickú stavbu, pevnosť masívu, diskontinuity, pórovitosť, primárnu a sekundárnu napätosť, stav podzemnej vody.
2. Faktory raziaceho stroja sa týkajú nasledovných parametrov strojného razenia:
  - a. konštrukčné parametre raziaceho stroja - geometria (veľkosť, počet a rozmiestnenie diskov na raziacej hlave),
  - b. aplikované režimové parametre (prítlak na disk, otáčky hlavy, krútiaci moment),
  - c. opotrebovanosť rozpojovacích nástrojov (otupenosť ostria diskov),
  - d. prevádzkové podmienky stroja ovplyvňované organizáciou práce.

Posudzovanie raziteľnosti hornín pri razení plnoprofilovým raziacim strojom často komplikuje množstvo parametrov, ktoré je potrebné brať do úvahy. Na predikciu výkonu TBM bolo vo svete vyvinutých viacero modelov, ktoré sú založené na dvoch hlavných prístupoch, na teoretickom a empirickom. Prvý vychádza z rozpojovacích síl pôsobiacich na jednotlivých diskoch, druhý z dosahovaného výkonu TBM ako celkového systému priamo v teréne. Teoretické modely zastupujú vo svete využívané modely CSM (Ozdemir, 2006) a Fukui-Okubo (Fukui, Okubo, 2006). Medzi najvyužívanejšie empirické metódy patria modely NTH (Lislerud, 1988), metóda celkovej tvrdosti (Tarkoy, 1975) a Nelsonovej metóda (Nelson et al., 1985).

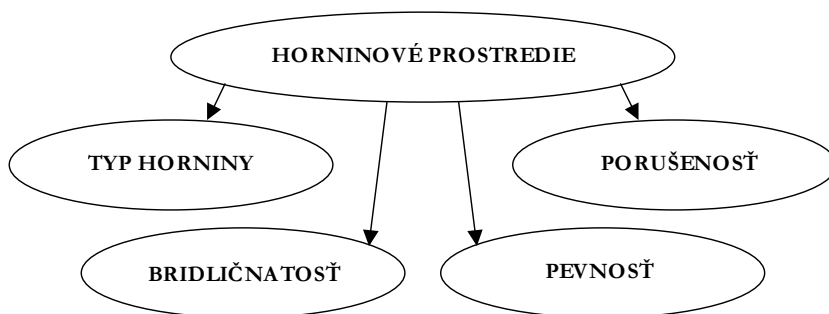
Medzi teoretické prístupy patrí i metóda IKONA vyvinutá na Ústave geotechniky SAV (Krúpa a kol., 1997, Krúpa, Lazarová, Labaš, 2000). Pri razení prieskumnej štôlne plnoprofilovým raziacim strojom je možné nepriamo z monitorovaných parametrov procesu razenia vyhodnocovať vlastnosti rozpojovanej horniny na čelbe diela. Na Ústave geotechniky SAV v Košiciach bola vypracovaná metóda IKONA, ktorá z monitorovaných údajov procesu razenia umožňuje stanovovať základné fyzikálno-mechanické vlastnosti rozpojovaných hornín, identifikovať tektonické poruchy horninového masívu, určovať porušenosť horninového prostredia a vypočítať ďalšie dôležité charakteristiky, popisujúce správanie hornín pri ich rozpojení. Tento spôsob hodnotenia horninového masívu bol použitý pri razení prieskumnej štôlne diaľničného tunela Branisko strojom WIRTH TB-II-330H/M a pri razení prieskumnej štôlne Višňové-Dubná skala strojom Voest Alpine ATB 35HA. Systém IKONA umožňuje doplniť výsledky podrobného inžiniersko-geologického prieskumu o kvázi kontinuálny záznam zmien vyhodnocovaných charakteristík horninového prostredia. Rádovo sa zvyšuje počet „meraní“, čo dáva možnosť hodnotiť horninový masív a jeho ľubovoľné časti v trase razenej prieskumnej štôlne štatistickými metódami. Na základe výsledkov korelácie rôznych metodík tlakovej pevnosti horniny v trase razenia prieskumnej štôlne Branisko sa potvrdila vhodnosť použitia modelovej pevnosti horniny v tlaku na podrobné charakterizovanie pevnostných vlastností razenej horninového masívu (Krúpa, 1998).

Monitorovaním parametrov raziaceho režimu TBM WIRTH v časovom intervale 2,03 s počas razenia prieskumnej štôlne tunela Branisko sa získala rozsiahla databáza údajov. Snímanými parametrami raziacej hlavy boli prítlak, krútiaci moment, otáčky a poloha vysunutia raziacej hlavy. V reálnom čase priamo počas razenia sa automaticky vypočítavala okamžitá rýchlosť razenia, špecifická energia rozpojovania a odporúčaný optimálny prítlak. Následne boli získané hodnoty uvedených parametrov priemerované pre úseky dĺžky cca 25 cm. Dodatočne boli vypočítané ďalšie parametre pomocou inverznej kontinuálnej metódy stanovenia vlastností horninového masívu IKONA, ktorá vychádza z matematického modelu interakcie raziacej hlavy TBM s horninovým masívom. Týmito parametrami boli modelová tlaková pevnosť horninového masívu  $\sigma_{tH}$ , monitorovaný uhol vnútorného trenia  $\phi_M$ , modelová porušenosť masívu  $RQD_t$ , rezný koeficient  $C$ ,

ťahová pevnosť  $\sigma_t$ , modelová šmyková pevnosť  $\tau_{sk}$  a modelová pevnosť v prostom strihu  $\tau_{ps}$ . Takto bolo získaných 5036 sád hodnôt parametrov, ktoré tvorili základnú databázu pre ďalšie analýzy. Za jednu sadu dát, resp. jedno meranie, sa považujú údaje pre jedno konkrétne staničenie, teda pre cca 25 cm trasy prieskumnej štôlne. V geologických celkoch 28-30 a 32-34 neboli dostupné údaje kvôli poruche monitorovacieho systému, (Krúpa, 1998).

### 3 ANALÝZA VPLYVU HORNINOVÉHO PROSTREDIA NA MONITOROVANÉ A MODELOVÉ PARAMETRE PROCESU RAZENIA

Vizuálne porovnávanie súborov údajov pomocou krabicových grafov umožňuje analyzovať vplyv rôznych faktorov na monitorované a modelové parametre procesu razenia. Vplyv horninového masívu na skúmané parametre bol študovaný v závislosti od typu horniny, jej bridličnatosti, pevnosti horniny a porušenosti horninového masívu. Štatistická metóda ANOVA (analýza rozptylu) umožňuje kvantitatívne posudzovať vplyvy nezávislých premenných (tzv. faktorov) na závislú premennú.



Obr. 1: Skúmané faktory horninového prostredia v analýze rozptylu

Jednotlivé faktory (Obr.1) dosahovali rôzne úrovne, v ktorých boli hodnotené štatistické charakteristiky parametrov základnej databázy. Jednotlivé faktory *typ horniny*, *pevnosť horniny* a *porušenosť horniny* boli sledované v geologických celkoch 1–27, teda v staničení 136 až 1320 m od východného portálu. Faktor *bridličnatosť* bol skúmaný v geologických celkoch 10 – 27, (staničenie 526 až 1320 m od východného portálu), kvôli obmedzenej dostupnosti údajov o bridličnatosti hornín z geologického prieskumu. Celkový prehľad faktorov využitých v analýze vplyvu podáva tabuľka 2.

Faktory typ horniny a bridličnatosť pochádzali z podrobného inžiniersko-geologického prieskumu. Pevnosť horniny bola posudzovaná ako triedy klasifikácie ISRMM na základe modelovej pevnosti horniny  $\sigma_{tH}$ , porušenosť horninového masívu reprezentovali triedy klasifikačného systému RQDM na základe modelového indexu RQDt.

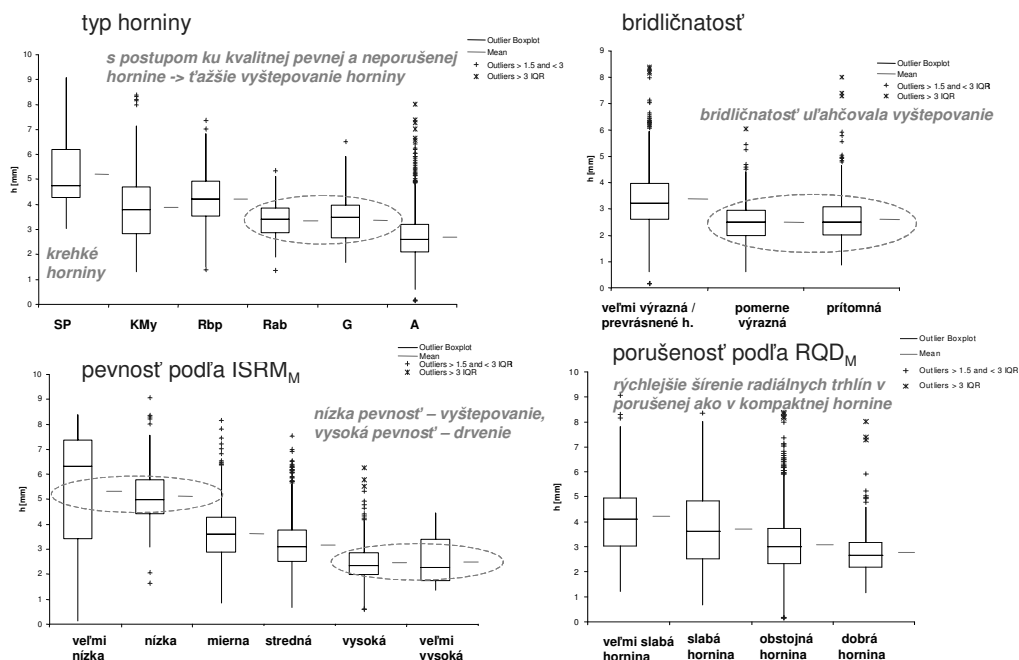
Metodiky popisnej a porovnávacej štatistiky ako histogramy, krabicové grafy a analýza rozptylu poskytli možnosť hľadať väzby medzi horninovým prostredím, v ktorom sa realizovalo razenie, a sledovanými parametrami procesu razenia, a tak určiť dominantné vplyvy horninového prostredia na jednotlivé parametre. Pre značný rozsah grafických a numerických analýz sú v ďalšom texte uvedené sumárne informácie o vplyve horninového prostredia na vybrané sledované parametre, konkrétne na hĺbky vyštepovania horniny  $h$ , špecifickú energiu rozpojovania wrozp, modelovú pevnosť v tlaku  $\sigma_{tH}$  a rezný koeficient  $C$ .

Hĺbka vyštepovania horniny  $h$  (Obr. 2) pod diskami raziaceho stroja predstavuje penetráciu disku do horniny zväčšenú o hrúbku vyštiepeného kusu horniny medzi dvoma susednými zárezmi (dráhami) diskov raziacej hlavy. Vyštepovanie horniny uľahčovala nízka pevnosť horninového materiálu, ktorá umožnila jednoduché šírenie radiálnej trhliny v hornine pod diskom, podobne ako výrazná bridličnatosť (hoci pevnejšej) horniny. Malá hĺbka vyštepovania horniny v pásme pevných a kompaktných (málo porušených) hornín bez výraznej bridličnatosti indikuje, že v takýchto

horninách doc Obr. 2 Hĺbka vyštepovania horniny v závislosti na type horniny, bridličnatosti, pevnosti a porušenosti horninového masívu hádzalo skôr k drveniu horniny, než k jej vyštepovaniu pomocou šmykových napätí. Naopak krehké pieskovce umožnili ľahké vyštepovanie masívnych kusov horniny i pri nízkych hodnotách tlaku na raziacu hlavu.

Tab. 1: Prehľad faktorov a ich úrovní posudzovaných v analýze rozptylu

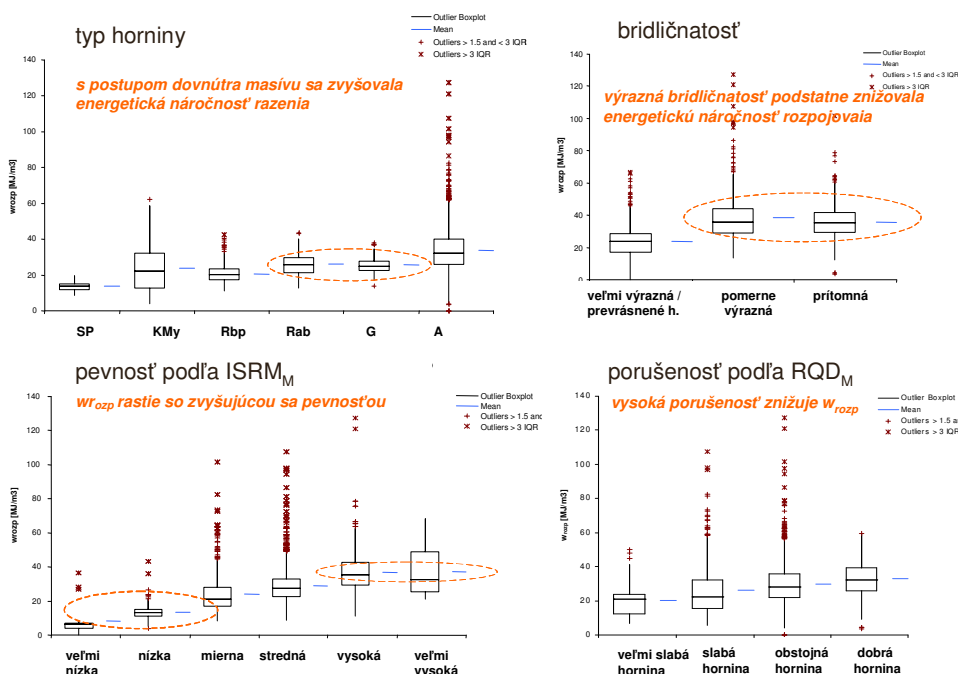
Faktory a ich úrovně		
Faktor: Typ horniny		
Úroveň faktora	Geologické celky	Počet údajov z GC 1-27
SP pieskovce	1, 2	117
KM mylonity	10, 13, 20	226
Rbp biotitické ruly	3, 4, 6, 7	496
Rab ambibolické ruly	8, 9	192
G granitoidy	5	263
A amfibolity	11, 12, 14-19, 21-27	2131
Faktor: Pevnosť horniny modelovaná $\sigma_{tH}$		
Úroveň faktora	Stredná hodnota $\sigma_{tH}$ [MPa]	Počet údajov z GC 1-27
veľmi nízka	3,54	23
nízka	17,38	181
mierna	39,09	716
stredná	73,03	1480
vysoká	143,37	991
veľmi vysoká	278,14	34
Faktor: Bridličnatosť		
Úroveň faktora	Geologické celky	Počet údajov z GC 10-27
1 Veľmi výrazná bridličnatosť premenlivého sklonu a smeru, foliačné plochy miestami sprehybané až prevrásnené	10, 11, 12, 13, 14	721
2 pomerne výrazná bridličnatosť	18, 20, 21, 22, 24, 25, 27	513
3 bridličnatosť prítomná	15, 16, 17, 19, 23, 26	1123
Faktor: Porušenosť horniny modelovaná $RQD_t$		
Úroveň faktora	Stredná hodnota $RQD_t$ [%]	Počet údajov z GC 1-27
veľmi slabá	11,05	83
slabá	41,03	526
obstojná	63,67	2369
dobrá	79,02	443



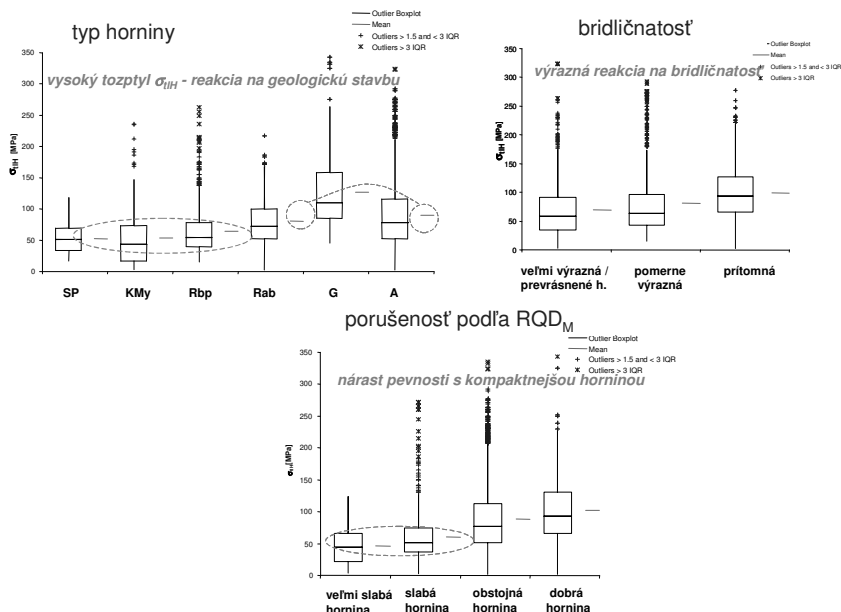
Obr.2: Hĺbka vyštepovania horniny v závislosti na type horniny, bridličnosti, pevnosti a porušenosť horninového masív

Špecifická energia rozpojovania wrozp (Obr. 3) ktorá predstavuje energetickú náročnosť rozpojovacieho procesu, stúpala počas razenia od málo pevných a veľmi porušených hornín k pevnému, kompaktnému masívu. Výrazne ju ovplyvňovala bridličnosť hornín v kombinácii s pevnosťou a porušenosťou. Z celkových priebehov špecifickej energie rozpojovania je zrejmé, že drvenie horniny diskom v kompaktných horninách predstavuje energeticky omnoho náročnejší proces ako vyštepovanie horniny pomocou šmykových napätí v menej pevných a porušených horninách, kde sa hlavná radiálna trhlina pod diskom šíri jednoduchšie. S postupom raziaceho stroja do vnútra masívu postupne rástla pevnosť horniny a masív sa stával kompaktnejším. V smere od ústia tunela do vnútra masívu sa zvyšovala hrúbka nadložia, čo vo všeobecnosti spôsobuje nárast geostatického tlaku ako vertikálneho napätia, a tým i rast bočných tlakov. Celkový rast primárnych napätí spôsobuje pevnejšie votknutie horniny v masíve, čo sťažuje rozpojovanie horniny, dokumentované trendom postupného zvyšovania hodnôt špecifickej energie rozpojovania v smere trasy prieskumnej štôlne od ústia do vnútra masívu. Tento celkový trend rastu pevnosti horniny, znižovania porušenia a zvyšovania energetickej náročnosti rozpojovania narušovali lokálne diskontinuity v masíve a prítomnosť výraznej bridličnosti.

Modelová pevnosť horniny v tlaku  $\sigma_{tIH}$  (Obr. 4) dosahovala najvyššie hodnoty v kompaktných granitoidoch v geologickom celku 5. Modelová pevnosť v tlaku citlivo reagovala na diskontinuity v horninovom masíve. V amfibolitoch a rulách ju znižovala ich bridličnosť, v mylonitoch celková výrazná porušenosť. Keďže už v predchádzajúcom výskume na Ústave geotechniky SAV (Krúpa, Lazarová, 2004) bola preukázaná dobrá korelácia skleroskopkej tvrdosti horniny s modelovou pevnosťou, analýza priniesla nové poznatky o vplyve typu horniny, porušenia a bridličnosti aj na hodnoty skleroskopkej tvrdosti hornín.

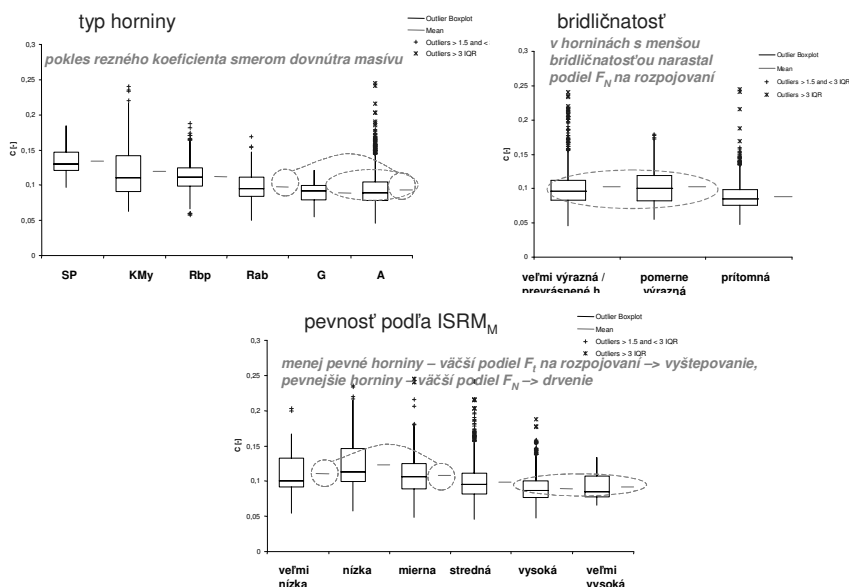


Obr. 3: Špecifická energia rozpojovania v závislosti na type horniny, bridličnatosti, pevnosti a porušenosťi horninového masívu



Obr. 4: Modelová pevnosť v tlaku v závislosti na type horniny, bridličnatosti a porušenosťi masívu

Rezný koeficient  $C$  (Obr.5), ktorý vypovedá o podmienkach rozpojovania, so zvyšovaním kvality a pevnosti horninového masívu pozvoľna klesal. Vyššie hodnoty  $C$  reprezentujú nižší podiel normálovej sily na rozpojovaní horniny, teda viac sa uplatňujú tangenciálne sily (vyštepovanie horniny). V pevných a kompaktných horninách dochádzalo k zníženiu  $C$ , teda k zvýšeniu podielu normálovej sily na razení, čo vyvolávalo drvenie horniny pod diskom.



Obr. 5: Rezný koeficient v závislosti na type horniny, bridličnatosti a pevnosti horninového masívu

Kvôli vylúčeniu autokorelácie bola vylúčená analýza vplyvu pevnosti horniny na modelovú pevnosť horniny, ako aj vplyv porušenia masívu podľa RQDt na rezný koeficient.

## 4 ZÁVER

Spracovanie výsledkov podrobného inžiniersko-geologického prieskumu z prieskumnej štôlne diaľničného tunela Branisko, doplnených o výsledky monitorovania procesu razenia plnoprofilovým raziacim strojom WIRTH TB-II-330H/M ukazuje, že takýto prístup dáva silný prostriedok pre ďalšie podrobné štúdie plnoprofilového razenia s využitím nepriamych matematických metód. V príspevku boli použité metódy popisnej, porovnávacej štatistiky a analýzy rozptylu, ktoré vyžadujú rozsiahle súbory dát. Ich implementácia do informačného systému plnoprofilového raziaceho stroja typu TBM, umožňuje upraviť dáta získané z monitorovania procesu razenia tak, aby sa vplyvy technológie razenia a organizácie práce stali marginálne. Získal sa tak nový prostriedok na podrobné hodnotenie vlastností horninového masívu v trase razeného podzemného diela. Výhodou takéhoto prístupu je, že informácie o horninovom prostredí a jeho zmenách sa môžu získavať v reálnom čase, t.j. už počas razenia. Razenie bez prestojov vynútených kvôli dodatočným geotechnickým testom a skúškam môže výrazne zlepšiť plynulosť razenia, a tým znížiť ekonomické náklady na razenie.

## POĎAKOVANIE

Príspevok bol realizovaný v rámci riešenia grantu VEGA 2/0086/09.

## LITERATÚRA

- [1] FUKUI, K. & OKUBO, S. Some Attempts for Estimating Rock Strength and Rock Mass Classification from Cutting Force and Investigation of Optimum Operation of Tunnel Boring Machines. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2006, Vol.39, Nr.1, pp.25-44. ISSN 0723-2632.
- [2] KRÚPA, V. Hypotézy, modely, teórie a ich verifikácie pri plnoprofilovom razení. Doktorská dizertačná práca, Ústav geotechniky SAV, Košice. 1998. 251 s.

- [3] KRÚPA, V. & LAZAROVÁ, E. & KREPELKA, F. & HALUŠKA, J. & HAJDUK, P. & LABAŠ, M. *Optimalizátor procesu razenia pre raziaci stroj WIRTH TB-II-330H/M*. Expertízna správa, ÚGt SAV Košice, február 1997, 3 s.
- [4] KRÚPA, V. & LAZAROVÁ, E. & LABAŠ, M. Prediktion der Storungen im Gesteinsmassiv bei der Rechneroptimierung des TBM - Vortriebs. *Proceedings of the EUROCK 2000 Symposium*, (eds.) Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.(DGGT), Aachen, March 2000, Verlag Gluckauf GmbH - Essen, pp. 243-247. ISBN 3-7739-1246-3.
- [5] KRÚPA, V. & LAZAROVÁ, E. Tri pevnostné charakteristiky hornín Braniska. *Geotechnika 2004 – Geotechnics: 9. ročník medzinárodnej konferencie*, Štrbské Pleso, 22.-24. 09. 2004. Zborník referátov, Orgware Stupava. s. 35-38. ISBN 80-8073-151-9.
- [6] LISLERUD, A. Hard rock tunnel boring, prognosis and costs. *Tunneling and Underground Space Technology*. 1988, Vol 3, s. 9-17. ISSN 0886-7798.
- [7] NELSON, P.P. & AL-JALIL, Y.A. & LAUGHTON, C. *Tunnel Boring Machine Project Data and Construction Simulation*. 1994. Geotechnical Engineering Report GR94-4, University of Texas at Austin, USA.
- [8] OZDEMIR, L. *CSM computer model for TBM performance prediction*. Excavation Engineering and Earth Mechanics Institute, Colorado School of Mines.
- [9] TARKOY, P.J. Practical Geotechnical and Engineering Properties for Tunnel-Boring Machine Performance Analysis and Prediction Transportation Research Record 1087. Transportation Research Board. National Research Council, s.62-78.
- [10] YAGIZ, S. A Model for Prediction of Tunnel Boring Machine Performance. Substructures and Underground Space. *Engineering geology for tomorrow's cities*. The 10th International Association of engineering geologists Congress. The Geological Society of London, Nottingham, September 6-10 2006, United Kingdom

**Oponentní posudek vypracoval:**

Doc. RNDr. Vojtech Gajdoš, CSc., Univerzita Komenského v Bratislave